

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПЛАСТИЧНОСТЬ И ПОВРЕЖДЕННОСТЬ МОЛИБДЕНА

INFLUENCE OF WORM DEFORMATION PARAMETERS ON COMMERCIAL-PURITY MOLYBDENUM PLASTICITY AND DAMAGE

¹С.В. Смирнов, ¹А.В. Нестеренко, ²В.П. Швейкин

¹ Институт машиноведения Уральского отделения РАН, Екатеринбург,
(620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34),
svs@imach.uran.ru

²УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина - УПИ, Екатеринбург, (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Abstract

The basic equations of damage mechanics for commercial-purity molybdenum at 500°C and 900°C has been found experimentally. Plasticity diagram that relate the limiting strain before the failure to the stress state indices has been constructed according to the results obtained by the original device under hydrostatic pressure. Plasticity of the material is found to depend substantially on the type of stress state, which is characterized by the Lode parameter. Plasticity at alternating deformation has been found. The damage theory is used to study the healing of the deformation-induced damage during annealing and to determine the conditions under which irreversible damage, which cannot be healed by heat treatment, appears. The results may be used to develop new technologies of molybdenum deformation treatment.

Введение

Экспериментально установлены базовые соотношения механики поврежденности для молибдена высокой чистоты при температурах 500°C и 900°C. Диаграммы пластичности, связывающие предельную деформацию до разрушения с показателями напряженного состояния, построены по результатам механических испытаний образцов в условиях гидростатического давления на оригинальной установке. Установлено, что пластичность молибдена значительно зависит от вида напряженного состояния, характеризуемого параметром Лодде. Определена пластичность в условиях знакопеременной деформации. Исследовано залечивание деформационной поврежденности молибдена при отжиге и определены условия, при которых появляется остаточная поврежденность, не исчезающая при отжиге. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых технологий деформационной обработки молибдена.

Процессы деформирования твердых тел при их обработке давлением зачастую приводят к исчерпанию способности деформироваться без разрушения. Происходит это из-за образования и развития дефектов сплошности в виде микропор и микротрещин, рассеянных по объему изделия, отрицательно влияющих на комплекс механических, служебных свойств и не поддающихся обнаружению современными методами неразрушающего контроля. Прогнозировать развитие поврежденности и ускорить процесс выбора путей оптимизации способов и режимов деформационной и термической обработок можно с помощью моделей механики поврежденности.

Согласно модельным представлениям научной школы В.Л. Колмогорова [1,4,6,8], под поврежденностью понимается скалярный параметр ω , который изменяется от 0 в начальный момент де-

формации до 1 при разрушении. Промежуточные значения ω характеризуют уровень развития микродефектов сплошности относительно его предельного состояния. По расчетной величине ω можно количественно оценить степень использования ресурса пластичности деформируемого металла и качественно оценить морфологические особенности микродефектов, возникающие при пластической деформации металлов, если воспользоваться рекомендациями [1,8].

На этапах деформации по характеру близкой к простому нагружению поврежденность определяется по формуле

$$\omega = \int_0^{\Lambda_p} \frac{d\Lambda}{\Lambda_p}, \quad (1)$$

а на этапах немонотонной деформации – по формуле

$$\omega = \sum_{i=1}^N \left[\int_{\Lambda_{i-1}}^{\Lambda_i} \frac{d\Lambda}{\Lambda_{pi}} \right]^a, \quad (2)$$

где $i=1...N$ – номер этапа немонотонной деформации, Λ_p – функция, аппроксимирующая диаграмму пластичности, a – величина, характеризующая влияние немонотонности деформации на накопление поврежденности. Основой для расчета поврежденности металла при обработке давлением и оценки вероятности микро- или макроразрушения являются экспериментальные зависимости пластичности и показателя a от термомеханических параметров процесса пластической деформации.

Зависимости

$$\Lambda_p = \Lambda_p(k, \mu_\sigma, H, \Theta), \quad (3)$$

$$a = a(k, \mu_\sigma, H, \Theta), \quad (4)$$

где $k = \sigma/T$ – отношение гидростатического напряжения и интенсивности касательных напряжений, называемое показателем напряженного состояния, μ_σ – показатель Лоде, характеризующий вид девиатора напряжений, H – интенсивность скорости деформации сдвига, Θ – температура, называются базовыми или определяющими соотношениями механики поврежденности являются фундаментальными характеристиками материала как объекта пластической обработки, позволяющими осуществлять моделирование процессов разрушения металлов при пластических деформациях.

При термической обработке, которой сопровождаются многие процессы обработки давлением, происходит восстановление пластических свойств металла. В основе явления восстановления пластичности лежат процессы релаксации (возврат, полигонизация, рекристаллизация), наблюдаемые при нагреве деформированного металла, а также диффузионные процессы массопереноса при нагреве в области высоких температур. Степень восстановления ресурса пластичности при термической обработке за счет залечивания деформационной поврежденности характеризуется зависимостью $\omega_{ост.} = f(\omega_1, \Theta, t)$, связывающей величину остаточной поврежденности $\omega_{ост.}$ с ее величиной ω_1 до термической обработки при температуре Θ в течение времени t .

Цель работы

В работе ставилась задача установить определяющие соотношения механики поврежденности для молибдена марки МЧВП, используемого как материал труб в энергетике. Выбор молибдена, в качестве материала для исследований обусловлен его ограниченной технологической пластичностью, высокой чувствительностью к концентраторам напряжений, низкотемпературной хрупкостью, высокой окисляемостью при нагреве, что сильно усложняет его обработку давлением. В то же время изделия из молибдена и его сплавов используются для изготовления ответственных изделий, работающих в экстремальных условиях, при которых наличие деформационных микродефектов является недопустимым.

Материал и методы исследования

Исследовали технически чистый молибден марки МЧВП, полученный по слитковой технологии с использованием вакуумно-дугового переплава. Образцы из молибдена МЧВП изготавливали из прутков $\varnothing 24$ мм, полученных после стадии горячей деформации.

В работах [1,4,5,6,8] было обосновано применение техники высоких давлений для определения диаграммы пластичности (3), что позволяет получать адекватные данные о пластичности в области сжимающих напряжений, характерных для процессов обработки металлов давлением. С тех пор было проведено большое количество исследований пластичности при комнатной температуре,

например [1,8]. Создание экспериментальной техники высоких давлений с возможностью нагрева образцов до 1100°C [5] позволило включить в число исследуемых труднодеформируемые материалы.

Предельные свойства в условиях циклического знакопеременного деформирования определяли величиной $a_0 = 1/\gamma$ из формулы [1]

$$a = a_0^{1+0,238k}, \quad (5)$$

где γ – показатель Менсона – Коффина из теории малоциклового усталости.

Залечивание поврежденности при термической обработке изучали в экспериментах по двухстадийной деформации в соответствии с методикой [1,8,7]. На первом этапе партию цилиндрических образцов подвергали растяжению со степенью деформации сдвига $0 < \Lambda_1 < \Lambda_p$. Внесенная при этом поврежденность составляла $0 < \omega_1 < 1$. Затем деформированные образцы отжигали в вакууме при температурах 800 и 1050°C с выдержкой 1 час, уменьшая накопленную поврежденность на величину $\Delta\omega$. Далее образцы растягивали до разрыва. При деформации на второй стадии Λ_2 в образец вносится поврежденность ω_2 . Расчет поврежденности на каждой из стадий растяжения осуществляли по формуле (1). Тогда величина залечивания поврежденности $\Delta\omega$ может быть определена из условия разрушения $\omega_1 - \Delta\omega + \omega_2 = 1$.

Результаты исследования и их обсуждение

Деформационные свойства определяли испытанием цилиндрических и плоских образцов. Цилиндрические образцы имели следующие размеры рабочей части: диаметр $4,0 \pm 0,05$ мм, длина $20,0 \pm 0,5$ мм. Плоские образцы имели размеры рабочей части: ширина $8,0 \pm 0,2$ мм, толщина $0,50 \pm 0,05$ мм, длина 25 ± 1 мм.

Диаграммы пластичности, устанавливающие связь между пластичностью металла и показателями напряженного состояния, строили по результатам механических испытаний образцов на оригинальной установке, подробно описанной в [5]. Величина давления в экспериментах варьировалась от атмосферного до 1 ГПа, при температурах испытаний 500°C и 900°C и скорости растяжения 10 мм/мин. Размеры образцов до и после испытания измеряли на инструментальном микроскопе с точностью $\pm 0,01$ мм.

Диаграмму пластичности при постоянном значении μ_σ аппроксимировали экспоненциальной зависимостью в виде

$$\Lambda_p = c_1 \exp(-c_2 k), \quad (6)$$

где c_1, c_2 – эмпирические коэффициенты.

Из рассмотрения диаграмм пластичности на рис.1 видно, что на пластичность исследованного материала существенное влияние оказывает вид напряженного состояния, характеризуемый параметром Лоде. Рост пластичности при температуре 500°C с увеличением доли сжимающих напряжений происходит более интенсивно в условиях осесимметричного растяжения, характеризуемого па-

раметром Лоде $\mu_\sigma = -1$, чем при плоской деформации ($\mu_\sigma = 0$). При температуре 900°C влияние показателя μ_σ на пластичность также весьма существенно, однако, оно не носит столь резко выраженный характер при увеличении сжимающих напряжений.

Интересно отметить, что, для исследованного материала, влияние показателя Лоде на пластичность сильнее влияния температуры. Так, из рисунка 1, видно что повышение температуры испытания с 500°C (кривая 2) до 900°C (кривая 4) практически не влияет на пластичность молибдена МЧВП при $\mu_\sigma = -1$. В то же время, при 500°C переход от плоского напряженного состояния (кривая 1) к осесимметричному (кривая 2) вызывает рост пластичности больший, чем увеличение температуры испытания от 500°C до 900°C (кривые 1 и 3 соответственно) при осесимметричном нагружении.

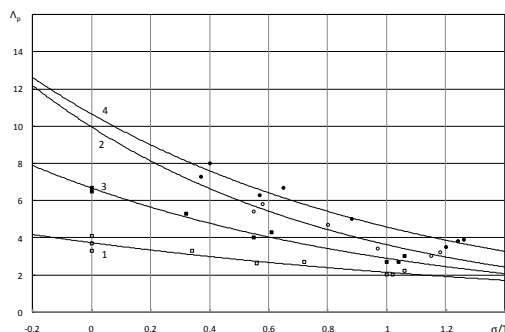


Рис.1. Диаграммы пластичности молибдена МЧВП при: 1 – 500°C , $\mu_\sigma = 0$; 2 – 500°C , $\mu_\sigma = -1$; 3 – 900°C , $\mu_\sigma = 0$; 4 – 900°C , $\mu_\sigma = -1$

Исследование пластичности в условиях знакопеременной деформации показало, что коэффициент $a_0 = 1,57$, тогда как для металлов обычно $a_0 > 2$ [1]. Столь малое значение a_0 можно связать с повышенной склонностью молибдена к расслоению, которое наибольшим образом проявляется при знакопеременной деформации. С повышением температуры величина a_0 вначале возрастает, а затем, достигнув максимума, снижается, как это видно из рисунка 2.

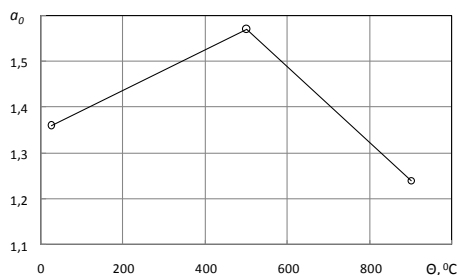


Рис.2. Влияние температуры испытаний на показатель a_0

Диаграммы залечивания поврежденности приведены на рисунке 3. Видно, что отжиг приводит к видимому снижению остаточной поврежденности по сравнению с исходной, однако, полностью поврежденность не устраняется. Подобный вид диаграмм [8] является характерным для процесса залечивания деформационных дефектов, контролируемого процессами возврата (рассасывание дислокационных скоплений, схлопывание упругих микротрещин и др.). Полное залечивание деформационных дефектов на стадии обратимой поврежденности наблюдается только при температурах выше температуры рекристаллизации, когда интенсифицируется механизм “пора на стоке” при прохождении границы зерна через микродефект [2,3]. При температуре отжига 1050°C наблюдается частичная рекристаллизация, что вызывает снижение остаточной поврежденности, но, по указанным выше причинам, она происходит не полностью. Используя результаты исследований [1,7], из анализа диаграмм залечивания можно определить предельное значение поврежденности $\omega_1 = \omega^*$, выше которой, в деформируемом металле образуются микродефекты, отрицательным образом сказывающиеся на таких важных характеристиках, как трещиностойкость, радиационная стойкость, циклическая долговечность и др. Это предельное значение поврежденности соответствует резкому излому хода диаграмм залечивания и для исследованного молибдена МЧВП $\omega^* \approx 0,35$.

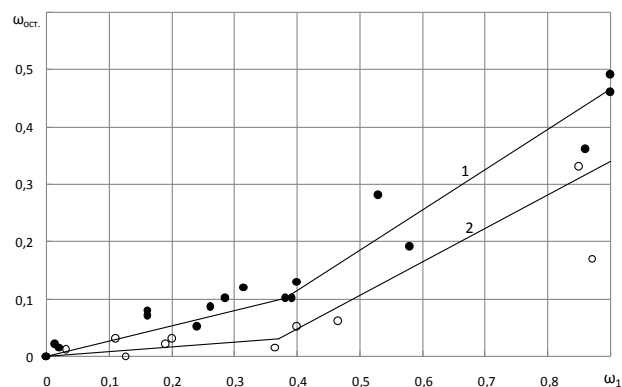


Рис.3. Залечивание поврежденности при отжиге с температурой: 1 – 800°C ; 2 – 1050°C

Результаты исследований могут быть использованы для расчета накопления поврежденности при деформациях с промежуточными термическими обработками.

Выводы

Получены определяющие соотношения механики поврежденности для молибдена марки МЧВП при температурах 500°C и 900°C используемых при его обработке давлением.

Установлено, что на пластичность исследованного материала существенное влияние оказывает вид напряженного состояния при деформировании.

нии, характеризуемый показателем Лоде μ_σ ; максимальным образом это влияние проявляется при температуре испытаний 500°C в области сжимающих напряжений, а наименьшим при температуре испытания 500°C в области интенсивных растягивающих напряжений.

Сплавы молибдена характеризуются низким, по сравнению с другими металлами, уровнем деформируемости при знакопеременной деформации, что может быть связано с их склонностью к возникновению трещин расслоения; наилучшую деформируемость в этих условиях исследованный материал имеет при температуре 500°C, но при повышении температуры деформируемость при знакопеременной деформации резко уменьшается.

В результате исследования залечивания деформационной поврежденности при термической обработке определено предельное значение поврежденности $\omega^*=0,35$, при превышении которого, в деформируемом металле образуются микродефекты, которые не устраняются полностью при термообработке и могут отрицательным образом сказываться на механических свойствах и эксплуатационных характеристиках изделий.

Список литературы

1. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия. 1984. 144 с.
2. Вакуумная металлургия тугоплавких металлов и твердых сплавов / М.В. Мальцев [и др.]. М.: Металлургия, 1981. 272 с.
3. Гегузин Я.Е. Макроскопические дефекты в металлах. М.: Металлургиздат, 1962. 252 с.
4. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М.: Металлургия. 1970. 230с.
5. Методики определения технологических свойств металла и его отдельных составляющих в условиях сложного нагружения / А.А. Богатов, С.В. Смирнов, В.П. Швейкин, А.В. Нестеренко // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. 1995. № 1. С. 42-49.
6. Пластичность и разрушение / под ред. В.Л. Колмогорова. М.: Металлургия, 1977. 337 с.
7. Смирнов С.В., Богатов А.А., Колмогоров В.Л. Исследование пластического разрыхления металла и залечивание деформационных дефектов при отжиге // Физика металлов и металловедение. 1980. Т. 49, вып. 2. С. 389-393.
8. Смирнов С.В., Швейкин В.П. Пластичность и деформируемость углеродистых сталей при обработке давлением. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 255 с.